

# スポーツ・運動学習へのコンピュータおよび情報機器の利用

—— リアルタイム映像分析による視覚的フィードバック ——

石 井 政 弘\*

効果的なスポーツトレーニングや運動学習をおこなうことを目的として、各種の映像分析とコンピュータ・グラフィックスを用いて視覚的なフィードバックシステムを試作し、実験検討をおこなった。

まず、スポーツ等の運動場面を2次元的な映像分析や、あるいは複数のカメラを用いての3次元映像分析によって、より正確に時系列にそった情報としてとらえた。さらに、その映像分析情報を、運動学習に必要な情報の意図的な再構成をおこなったり、さらに補助的な情報等を加えたりして実際のスポーツ・運動学習の場でいちやく2次元あるいは3次元のコンピュータ・グラフィックスとして作成した。これを運動学習をおこなう学習者に視覚的なフィードバック情報として提示し、その動作の変化や影響をシステム全体の将来性の検証を含めて検討をおこなった。

その結果、学習者の内省報告や動作分析の結果から、学習者自身の空間的イメージの認識という点にはある程度の有効性があり、その状況や学習者の能力などにもよるが、次の動作に大きく影響を及ぼしていくことが確認された。

## I 緒言

膨大な量の情報を映像として見せるコンピュータ・グラフィックスが1963年マサチューセッツ工科大学のI. E. サザーランドにより発表されて以来<sup>10)</sup>、この技術は主にCAD/CAM(コンピュータ支援設計・製造)、美術、コマーシャル等の分野に幅広く使われている<sup>2) 10) 16) 20)</sup>。また、X線CT(X線断層撮影装置)、MRI(核磁気共鳴断層装置)などのデータから人体の内部構造をコンピュータ・グラフィックスによって構築し研究および診断に利用しようとする試みもなされている<sup>16) 19)</sup>。

さらに、最近このコンピュータ・グラフィックスを、スポーツや体育学の分野に利用した例も見られるようになった<sup>3) 7) 8) 9) 22)</sup>。しかし、これらの利用例は、研究者が研究の初期段階で運動を種々の方向、距離から観察するのに手助けとなるような用いられ方が多く、直接に運動学

習をおこなう者のための有効な利用方法となるようなものではないと思われる。

ところで、運動技能を学習する者にとって、その初期の段階には反応の「結果の知識」(knowledge of results: KR)が、重要な意味を持つといわれている<sup>18)</sup>。これは、反応後目標の行動と実際の行動との差をもとに、次の行動の修正をおこなう外的フィードバックによる制御とも言われる。たとえば、バスケットボールのフリースローで1本目の失敗の仕方の情報をもとに、2本目をより確実にきめようとするようなことである(図1参照)。また、そのフィ

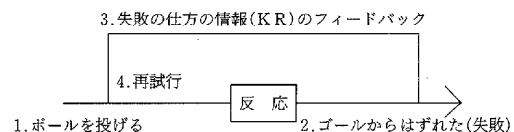


図1 フィードバックの例

ードバック情報にも至適量があり情報が少な過ぎても役に立たないし、多過ぎてもシステムの情報容量を氾濫させるにすぎない<sup>18)</sup>。さらに、質的なものも重要な問題であろう。つまり、シンガー<sup>18)</sup>が言う「それは、十分なフィードバックの有効性と、そのフィードバックを評価し利用する遂行者の能力によって決まる。」のである。

このフィードバックは使われる感覚の種類によって、視覚的フィードバック、聴覚的フィードバック（聴覚の中で言語による場合は特に言語的フィードバックとも呼ばれる）などに分けられる<sup>19)</sup>。フィードバック情報を与える一つの方法としてはコーチなどによるガイダンスやアドバイス等の形も古くから用いられてきている。もちろん、聴覚的（言語的）なものも指導上非常に大きなものとして考えられるが、本研究では特に、より空間的なイメージを認識するための視覚的フィードバックに着目してみた。

視覚的フィードバックの例として最近、練習中、あるいは練習後に学習者の運動をVTRなどによって見せる指導が多くおこなわれている。たしかにVTRは多くの情報を持っているし、疑似的に3次元的なイメージを学習者に与えることも可能であろう。

しかし、このような方法のみが有効な方法であろうか。たとえば、体操競技においては、よく手書きによる連続的な絵を指導の中に用いる。選手によってはわざわざビデオプリンターなどによってVTR画像を出力したもののほうがイメージがわかりやすいという者さえいる。また、他のスポーツでも指導の中に架空の運動の図を用いた方が説明しやすい場合があるようである。そこで、運動学習に必要な視覚的フィードバック情報としても、それが効果的であるならば、意図的で質的量的な再構成がおこなわれてもよいのではないだろうか。

この効果的な運動学習のための画像情報の“意図的で質的量的な再構成”をおこなえるものという点から、学習者によっておこなわれた運動から必要な情報を抽出しそれを再構成し、

学習者に視覚的フィードバック情報として与えることができる媒介としてコンピュータ・グラフィックスの利用を試みた。

このコンピュータ・グラフィックスを使えば、いろいろな表現で現象を再現でき、極端な場合たとえば核々と変化する学習者自身の眼から見る映像をも再現することが可能であろう。さらに、時間的な情報を加味したもの、映像の中に補助的なもの（たとえば、重心位置、運動の軸、ある部位の軌跡など）も付け加えることもできるであろう。また、いまだ実現されていない運動（たとえば、体操競技の新技など）を表現する事も可能であろう。

そこで、本研究の目的は、学習者の運動を運動学習の場ですばやく時系列にそって2次元あるいは3次元的に分析し、その情報を意図的に再構成し、さらに補助的な情報を加えたコンピュータ・グラフィックスによって、視覚的フィードバック情報を学習者に提示するためのシステムを試作し、その将来性及び問題点を検討するものである。

## II 方法

コンピュータ・グラフィックスによる視覚的フィードバック情報およびそのフィードバックシステムに関して、次のような問題点が考えられる。

1. まず最初の問題として古くからそれだけでも多くの研究者の研究課題でもあるが、運動場面などの現象をいかに正確に定量的にとらえるかの技術がいまだ研究途上ということである。多くの2次元あるいは3次元運動分析の方法がおこなわれているがいまだ完全な方法はない。特に、人体モデル等の構築をする場合その「形状モデリング」<sup>20)</sup>は正確な物体認識技術が必要である。人体以外の物体では工学的に種々の方法（触針法、光切断法、モアレ・トポグラフィ法、干渉法、ステレオ写真等）<sup>2)</sup>が開発されており、精度の高い形状モデリングを可能にしている。しかし、対象が人体の場合は多くの直

接的測定、光学的測定、CT撮影などがおこなわれてはいるが、3次元の人体モデルを構築するための資料はかなり不足しており、正確な形状モデリングは非常に困難である。

2. コンピュータ・グラフィックスによるフィードバックに必要な最も質的量的に有効な情報はどのようなものであるか。フィードバック情報を提示する方法（速度、試行から提示までの時間、提示から次の試行までの時間、提示する空間的および時間的範囲等の至適量など）はどのようなものが適当であろうか。さらに、このときコンピュータ・グラフィックス作成上の理論的な視点はどこへ持っていくべきか。また、いわゆる「お手本」のような補助的な情報の提示は有効か。

本研究ではこれら2つの問題を、以後に述べる暫定的に定義したパラメータを用いることにより、システムの構成および適用例に対する実験をおこなった。

#### [システム構成]

2次元システムは3次元システムの一部として実現可能なため、3次元システムを例にとって説明する。本システムでは、光学的な方法、つまりカメラによる映像分析を運動の記録・分析の方法として用いた。3次元分析の場合は2台のビデオカメラから入力された映像信号を画面合成し（同時に同期をとる）、VTRに記録する。この映像を再生しコンピュータ画像とスーパーインポーズし、マニュアル操作により2次元データのデジタイズをおこなう。そのデータをもとにコンピュータ内部で3次元座標を算出し、あらかじめ用意されたデータ（たとえば、以後に述べる実験では、座標軸、運動空間をイメージするための立方体、人体上の部位の位置関係など）と融合させ、3次元コンピュータ・グラフィックスを出力するものである。これらの作業は、本来映像分析のみでも膨大な時間がかかるが、ここでは種々の作業のオンライン化や意図的に疑似的なデータを用いることによって、スポーツ・運動学習の場で迅速におこなう

ことができるようにした。図2にその処理の流れの概要を示す。

座標系等の考え方はコンピュータ・グラフィックスにおける国際標準案であるGKS-3D (Graphical Kernel System) やPHIGS (Programmer's Hierarchical Graphics Standards) 等に準ずるものである<sup>7) 10) 11)</sup>。形状モデルは、

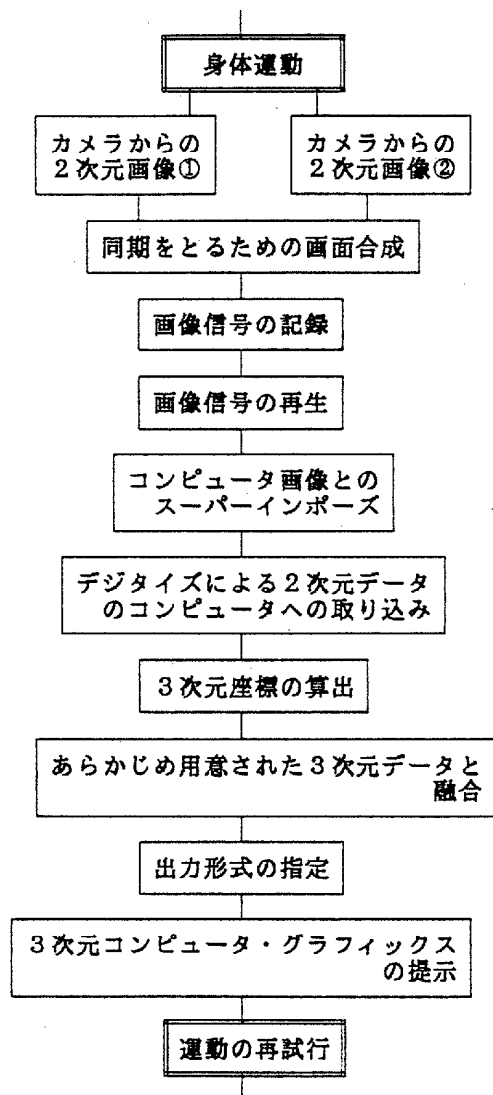


図2 処理の流れの概要

今回は速度等の問題からワイヤーフレーム・モデルを設定した。

具体的なシステムは、データ処理の高速性と簡便性などの点から VTR による映像から 3 次元データの算出をおこない、さらに、パーソナルコンピュータシステムを分析およびディスプレイ・デバイス（表示装置）に用いた。

また、実験中に撮影された映像をもとにして実験終了後により詳しく分析をおこなった。

### III 適用例

#### 実験 1

ダンスの中にも同様の運動がみられるが、女子体操競技における平均台の「片足立ちで 1 回ターン」（片足を床面に支持したままの 360° ひねり）を体育専攻の男子大学生におこなわせてみた。この運動を題材としたのは、このような回転運動が、多くの映像分析で用いられているように運動を 2 次元平面に近似することが極めて困難であるため、その視覚的フィードバックも、より 3 次元的イメージを持つことが必要であると思われるためである。

#### 〔運動の観察と評価基準の作成〕

実験に先だち、予備的な資料を得るために大学生の体操競技選手（男子 2 名、女子 2 名）にこの運動をおこなわせ 3 次元映像分析をおこなった。さらに、インタビューにより、どのような点に注意して運動をおこなっているかを調べた。安全を考慮して、床面に平均台を想定した 10cm 幅のラインを引き、その上からはずれないようにさせ、上方からみて反時計回りの回転をさせた。

分析の開始時点は右脚の離地、運動の終了時点はほぼ 1 周回転してから右脚の接地とした。

その結果次のようなことがわかった。

1. 普段から競技の中でこの運動を用いる女子体操競技選手の場合、二名とも回転中の頭頂点 (V) の、平均台中央を O とした横方向の移動量は最大でも左右へ 10cm 以内であり、なおかつ、移動範囲（左右の最大移動点の距離）もほ

ぼ 10cm 以内におさまる。また、競技にこの運動が含まれずあまりなれていない男子選手に比べ回転速度が速く（平均角速度が女子は 360 deg./sec. 以上、男子は 290 deg./sec. 以下）、なおかつ回転中さらに回転後に正確に左右のバランスを保っている。

2. 男女とも、故意に腕部、脚部、肩部の回転等に意識を持った場合、回転中あるいは回転後にバランスをくずしやすい（競技においては平均台からの落下、あるいは減点対象となる）。

3. 運動を円滑におこなうための意識としては、頭頂を、平均台を含む垂直面から離さないようにする、あるいは運動の軸をこの平面から離さないようにする、さらに、回転モーメントを小さくするように心掛ける等であった。

これらのことは、他の回転を扱った種々の文献の報告と一致する<sup>4) 5) 12)</sup>。

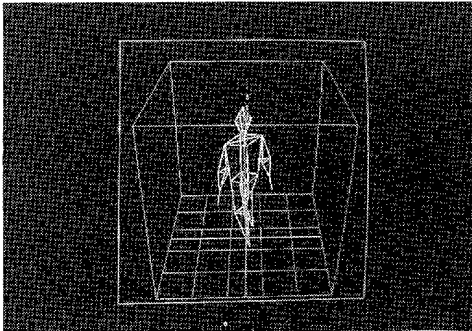
上記の結果をもとに次の実験をおこなった。

#### 〔実験方法〕

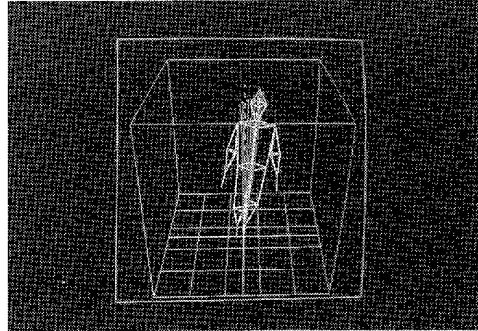
被験者は、体育専攻の男子大学生で、軟式庭球選手 2 名、陸上競技選手（短距離）3 名の計 5 名で、身長が 167cm から 170cm の者である。

実験に用いたコンピュータ・グラフィックス内の人体モデルは、名取ら<sup>13)</sup> および東京都立大学身体適性学研究室<sup>21)</sup> の人体各部の測定値をもとに平均的な日本人成人男子である身長 170cm、体重 62kg 程度のモデルを想定したものから、石井<sup>7)</sup> が人体モデルとして構築したものに、さらに、体操競技選手のフォームのイメージと 3 次元的なイメージの情報を加味したものである。

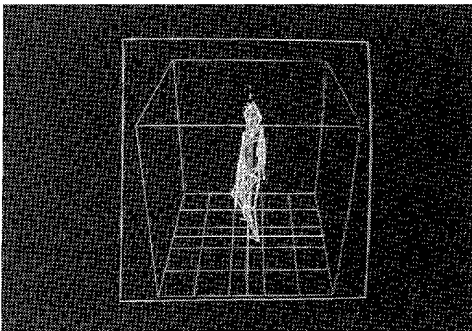
被験者に対し、言語により課題を説明したあと、約 2 分間隔で 8 回の運動をおこなわせた。その間第三者による指導はいつきいおこなわない。左脚の足先点を支持点として床面に対し反時計回りに回らせ、よりスムーズに、またなるべく平均台を仮定したラインから落ちないようにと指示した。試行間は椅子に座らせた。6 回目の試行をおこなったあとに、この 6 回目の試行の被験者の頭頂点の 3 次元空間内における位



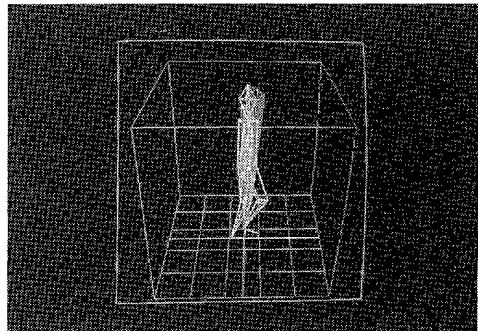
1



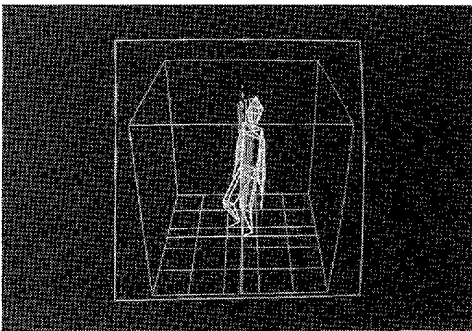
4



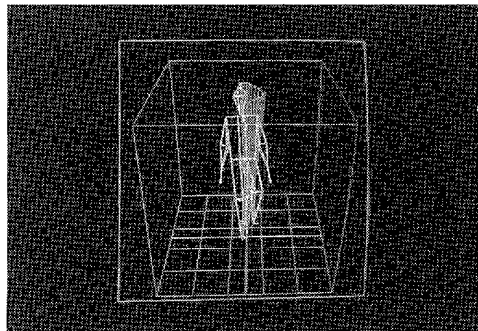
2



5



3



6

写真1 実験1に用いた「軸イメージ情報」をもつフィードバック情報の例

置座標の時間的変化を算出する。その位置と左脚の足先点とを結んだ線分（本実験では「軸イメージ情報」と呼ぶ）の動きを求める。

これらの情報から、運動開始時および運動終了時の視線に近いと思われる、被験者の後方で、30度の上方、距離は5 mに視点を置いたコンピュータ・グラフィックスによる人体モデルを動かす（例として写真1参照）。

コンピュータ・グラフィックスは実際の速度の1/20で、1辺1.7mの立方体、座標軸、および軸イメージ情報の時間的経過などの情報を付加して表現した。

6回目の試行の後、コンピュータ・グラフィックスによる視覚的フィードバック情報を被験者に提示し、第6試行から約2分後に7回目の試行をおこなう。さらに、7回目の試行をもとに同様の作業を繰り返したあとに、8回目の試行をおこなう。この試行の後に終了を伝え、すぐに試行に対する内省報告を聞いた。

#### 【結果と考察】

第一に、被験者の内省報告によると、5人ともコンピュータ・グラフィックスから自己の反応の3次元的な空間イメージの認識はある程度できるものの、そこから次回の遂行の段階で軸イメージ情報を平均台を含む垂直面に近づけようと試みるがなかなかうまくいかないようだと言っている。このことから、コンピュータ・グラフィックスによる視覚的情報は少なくとも3次元的な空間イメージの認識という点に関しては有効であるといえるかもしれない。

第二に、2方向からのVTRによる映像、そこから得られた図3のような3次元スティックピクチャーによる定性的分析、および定量的な3次元的分析によって客観的に反応の変容過程を観察した。

その結果、特徴的な結果を示した2名を例にとって、その結果と考察を以下に述べる。

図4-1から図4-6は被験者Aのものである。図4-1から図4-4のグラフの横軸はすべて時間（フルスケールで1500msec.）である。

図4-1から図4-3は被験者の両肩（左右の肩峰点）を結んだ線分と、両腰（左右の大転子点）を結んだ線分の、床平面への射影と平均台とのなす角の角度変化を、第6試行から第8試行まで示してある。図4-4は頭頂点の横方向の移動量を、第6試行から第8試行までの3試行分を重ねたものである。図4-5、図4-6は第6、第7試行から得られ被験者に提示したコンピュータ・グラフィックスの最後のコマと同じものを実験終了後にハードコピーしたものが附してある。図5-1から図5-6は同様に被験者Bのものである。

まず、二名とも運動そのものの良否はともかく、第6試行までの各試行は第1試行目を除いてほぼ安定した状態を示した（Aの回転に要する時間は950msec.から1050msec.、頭頂点の変位も±15cm以内、Bはそれぞれ、1300msec.から1550msec.、±20cm以内）。

第6試行目以降においてもAは回転に要する時間が、ほぼ1000msec.と一定しており、回転速度も速い。これは熟練者の傾向とほぼ同じである。角度変化は第6から第8試行まで大きな変化は見られない。頭頂点の変位に関しては、第7試行は第6試行の情報から修正を試みており、第8試行では結果的にバランスを逆方向に若干くずすことになったが、修正がさらに試みられている。

Bは、角度変化および頭頂点の変位から、第7試行は第6試行に比べ回転速度も遅く、頭頂点も左右に大きく動揺している。このことは、今回のフィードバック情報が逆に混乱を招いた結果であると思われる。しかし、第8試行においては、回転に要する時間、回転速度、頭頂点の変位すべてに関して、より熟練者に近い傾向を示している。

これらから、この適用例のコンピュータ・グラフィックスによる視覚的フィードバック情報は、目的の運動学習に対して有効なフィードバック情報であるかの確認は困難であるものの、少なくとも、次回の試行にある程度の影響をおよぼしていくことが確認された。つまり、実際

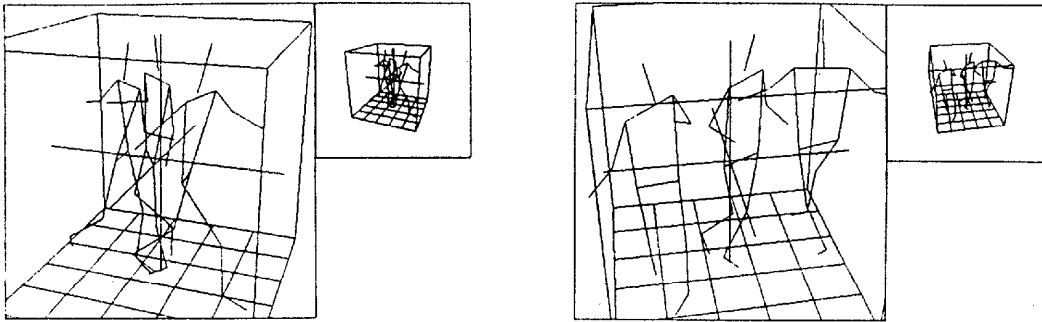
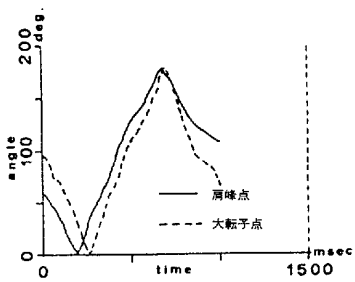
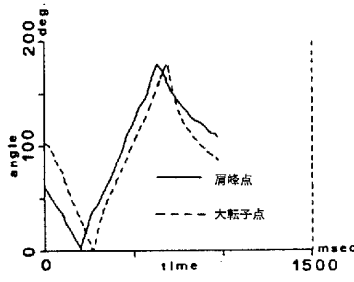


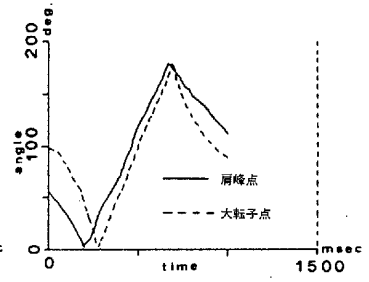
図3 3次元のスティックピクチャー



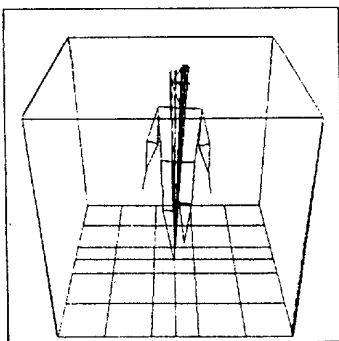
4-1  
第6試行の角度変化



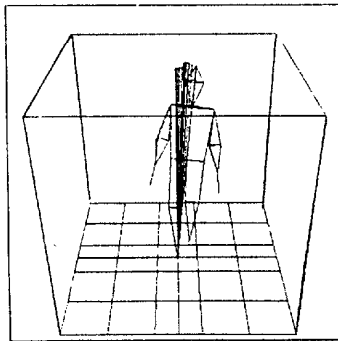
4-2  
第7試行の角度変化



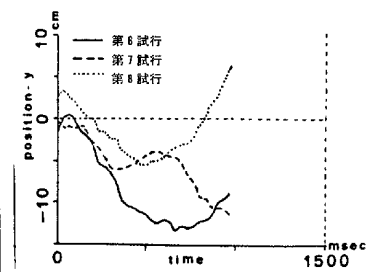
4-3  
第8試行の角度変化



4-5  
第6試行から得られたコンピュータ・グラフィックス



4-6  
第7試行から得られたコンピュータ・グラフィックス



4-4  
頭頂点のY成分の変化

図4 Aの分析結果とフィードバック情報

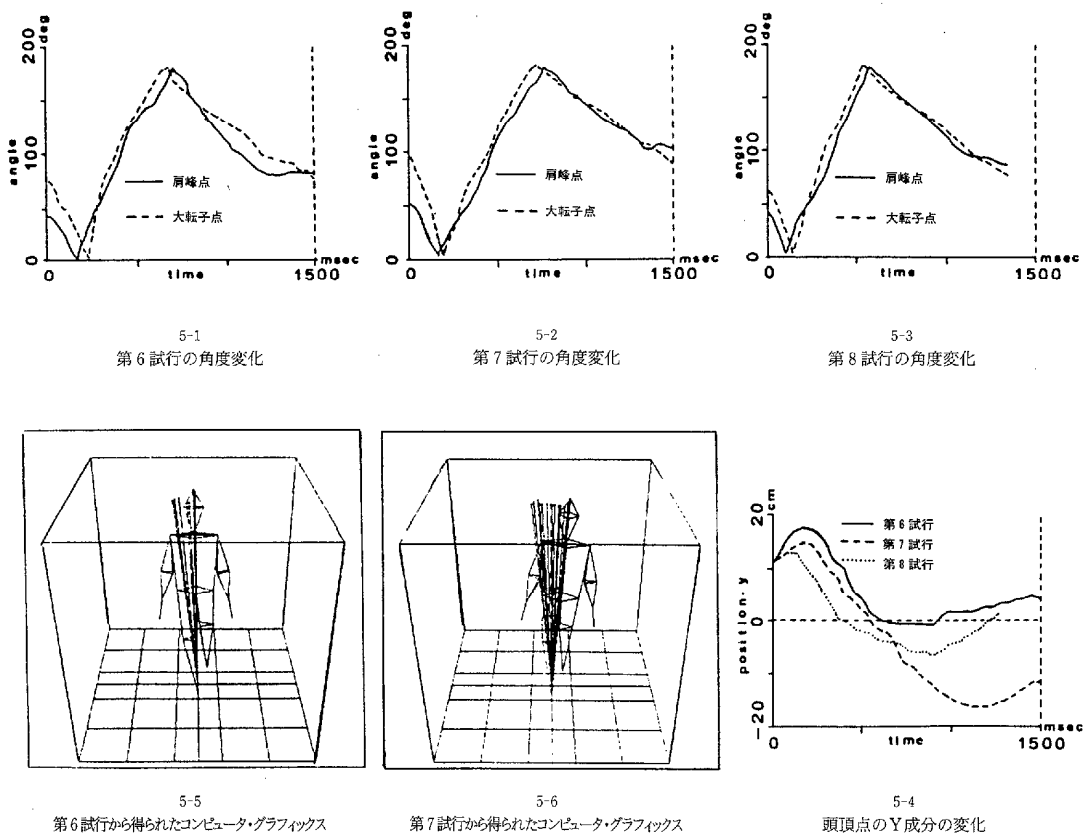


図5 Bの分析結果とフィードバック情報

のスポーツトレーニングや運動学習の場合においても、より効果的な提示方法を用いるならば有用なフィードバック情報となりうるものであろうことが推測された。

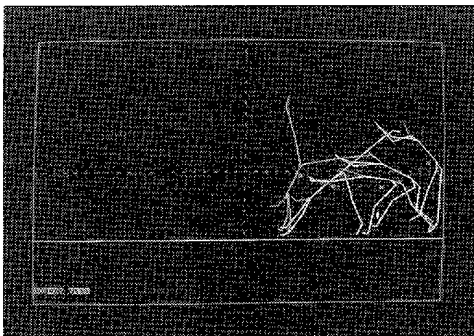
## 実験 2

次に、実際のスポーツ・運動学習の場により近い形で種々の適用を試み、フィードバック情報の有効性という観点からその内省報告の分析を中心に実験をおこなった。対象は大学生および社会人の体操競技選手である。

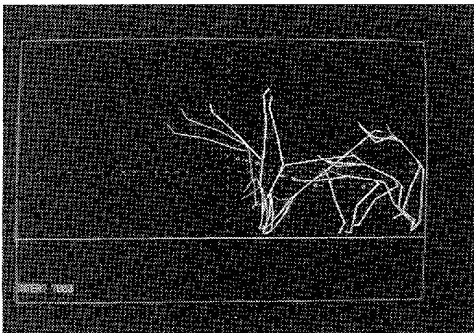
写真2は比較的体操競技経験の少ない者への適用例であるが、体操競技における床の前転跳び（ハンドスプリング）を課題としたときの、

選手自身へのフィードバック情報として実際に使ったコンピュータ・グラフィックスを示してある。このとき体操競技の技術のチェックポイントとなりうる、姿勢動作の残像、合成重心の軌跡、頭部位置のイメージの強調などの加工を加えてある。実際の表示はアニメーションのように連続的なイメージとして出力される。写真3は同様に全日本クラスのレベルの選手が後方2回宙返りを試みた時のフィードバック情報である。この2例が2次元的情報のフィードバックであったのに対して、写真4は同じく体操競技床の静止技を題材としての3次元コンピュータ・グラフィックスによるフィードバック情報への適用例である。こちらの表示は一つの姿勢

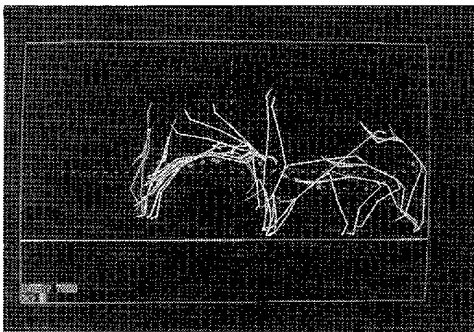




1



2



3

写真2 重心位置などを補助的な情報として用いた2次元的な応用例

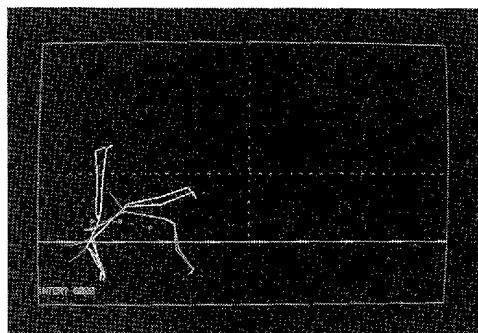
注：着地位置が高いのはソフトマットがあるため

を少しずつ視点を変えながらゆっくりと一回りさせて表示するものである（実は3次元コンピュータ・グラフィックスを時間的な動きで表現すると、いわば4次元の情報となってしまう表示が極めて困難なため、ここではまず静止技を題材とした）。

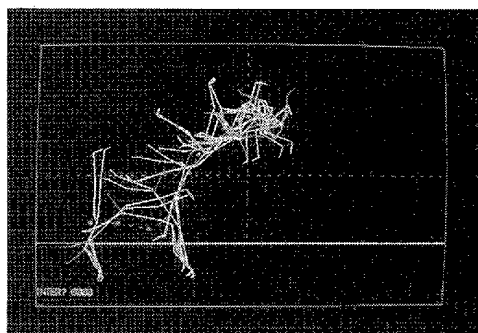
これらの結果から実験期間が2日間と短かったことや、選手達の技術レベルが写真2の被験者も含め、各々の運動に対してかなり高いところで安定しているため動作が簡単に変容するとは考えられず、また、実験後の詳細な3次元的な動作分析においてもフィードバック情報提示の前後で有意な差はみとめられなかった。しかし、内省報告においては、やはり選手自身が事前にかなり高い技術理解を持っていることから全員がコンピュータ・グラフィックスによるフィードバック情報にかなり高い関心を示し、空間的イメージの認識への有効性を認めている。特に、写真4のような体操競技の静止技を題材とした3次元コンピュータ・グラフィックスによるフィードバック情報への適用例では、今回、本人がはじめて自己の姿勢欠点を確認するといったことが認められた。また、同時に跳躍中の重心位置の高さなどの数的情報を積極的に要求する姿勢も見られた。

#### IV 結語

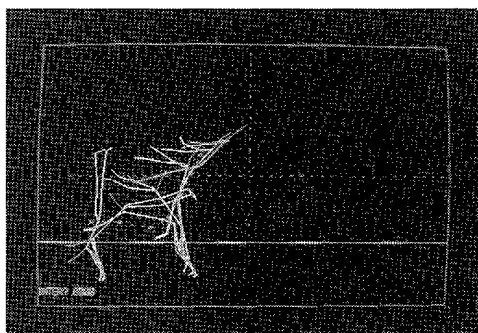
今回の研究から、コンピュータ・グラフィックスによるフィードバック情報が空間的なイメージの認識にある程度有効であることが確認されたことや、次の試行に影響をおよぼす反応がみられたこと、さらに、近年のめざましいコンピュータ・グラフィックスに対する研究を考えると、今後このコンピュータ・グラフィックスによるフィードバックシステムは、今以上の発展・進歩はあまり期待できない現在のVTRシステムのみの視覚的フィードバック方法に対して、より将来性を持つ有効的な方法になると思われる。つまり、現在のVTRによる画像情報はその表現がある程度固定的であるのに対し、



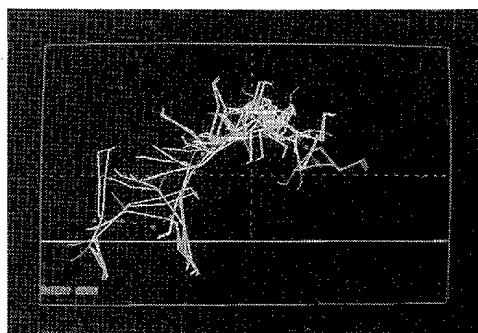
1



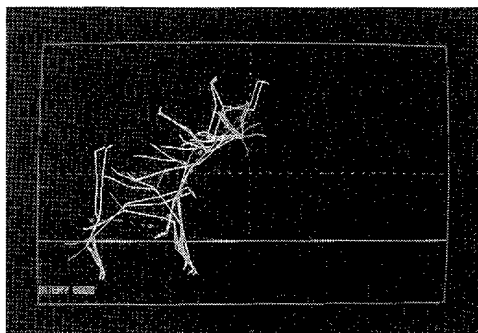
4



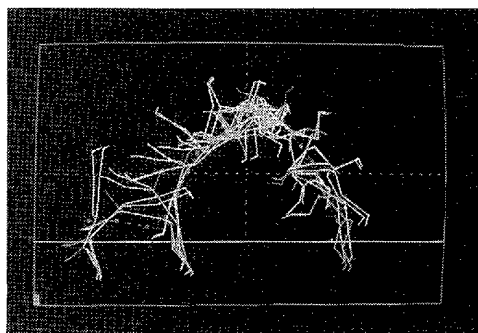
2



5



3



6

写真3 全日本クラスの選手への2次元的应用例

コンピュータ・グラフィックスは技術的な可能性としてはいくらかでも多彩な表現が可能であるからである。

また、コンピュータ・グラフィックスによるフィードバックシステムの将来的な課題としては、今以上のコンピュータ・グラフィックスに関する技術的問題に加えて、人間の情報処理過程の研究を含む学習理論、そしてこれらを融合させる理論および技術的な研究が必要である。

#### 文 献

- 1) Bullock, M. I. and I. A. Harley: The measurement of threedimensional body movements by the use of photogrammetry. Ergonomics, Vol. 15, No. 3, 309-322, 1972
- 2) 出澤正徳: 「CAD/CAM/CAE と物体認識技術」, CAD/CAM/CAE の基礎, 図形処理情報センター, 157-163, 1985
- 3) 深見和男, 石井政弘: 「身体運動の調整的能力に関する基礎的研究 [III] —身体拘束法による補償動作の解析—」, 日本大学文学部 (三島) 研究年報, Vol. 36, 249-262, 1988
- 4) 後藤かよ子, 宮下充正: 「Dance Kinesiology —長軸回転動作の分析—」, 体育の科学, Vol. 19, No. 8, 499-507, 1969
- 5) 池上康男: 「回転およびひねり運動の力学的基礎」, Sports sciences, Vol. 4, No. 2, 73-78, 1985
- 6) 池上康男: 「写真撮影による運動の三次元的解析法」, Sports sciences, Vol. 2, No. 3, 163-170, 1983
- 7) 石井政弘: 「映像解析における問題点—人体三次元コンピュータ・グラフィックスモデルによるシミュレーションからの検討—」, 核門体育学研究, Vol. 21, 37-44, 1987
- 8) 伊藤宏司: 「3次元身体運動動的解析支援システム」, デザントスポーツ科学, Vol. 8, 185-193, 1987
- 9) 岩田一明: 「コンピュータによる人間の運動動作解析—2次元運動動作の測定と解析」, PIXEL, No. 13, 129-134, 1983
- 10) 國井利泰: 「コンピュータ・グラフィックス」, イミダス1987, 集英社, 1986
- 11) 守川穰: 「3次元グラフィックス入門」, 月刊アスキー, No. 99, 136-139, 1985
- 12) 森下はるみ, 山本高司: 「舞踏における回転動作の研究 [II] —fouetté entourant について—」, 体育の科学, Vol. 23, No. 5, 246-253, 1973
- 13) 名取礼二, 小川義雄, 横堀栄, 木村邦彦: 「最新体力測定法」, 東京同文書院, 1970
- 14) 太田昌孝, 竹内あきら, 大口孝之: 「応用グラフィックス」, アスキー, 1986

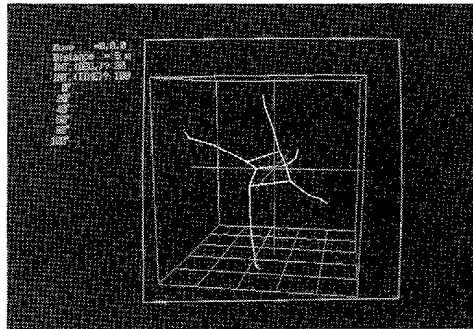
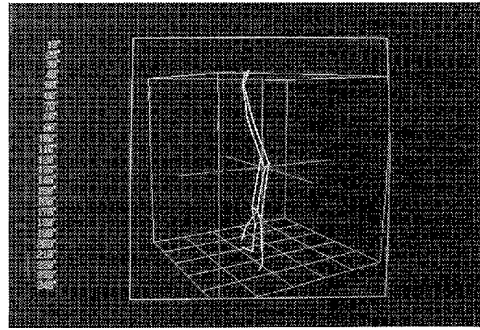
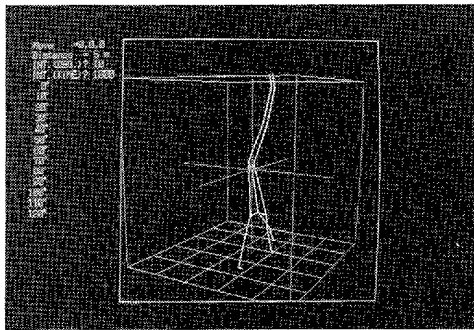


写真4 体操競技の静止技への3次元的应用例

注: 実際の表示は視点を変えながら一回転

- 15) 大築立志ほか：「現代体育・スポーツ大系」，講談社，1984
- 16) 佐藤昭彦：「アート&プレゼンテーション」，日経CG，No. 14, 40-44, 1987
- 17) Shapiro, R.: Direct linear transformation for threedimensional cinematography. Res. Quart., Vol. 49, 197-205, 1978
- 18) R. N. シンガー，松田岩男監訳：「スポーツトレーニングの心理学」，大修館書店，1986
- 19) 鈴木直樹，桜井健司，伊藤幹生，岡村哲夫：「CGでみる人体の二次元像」，Newton，Vol. 7, No. 10, 1987
- 20) 高橋靖：「工業デザインとCAD/CAM」，CAD/CAM/CAEの基礎，図形処理情報センター，130-136, 1985
- 21) 東京都立大学身体適性学研究室：「日本人の体力標準値第3版」，不昧堂出版，1970
- 22) 山田憲政ほか：「コンピュータを用いた3次元運動解析に関する基礎的研究」，筑波大学体育科学系紀要，Vol. 10, 167-175, 1987